数字空间表征的在线建构：来自干扰情境中数字 SNARC 效应的证据*

王强强[1] 张琦[1] 石文典[2] 王志伟[1] 章鹏程[3]

([1]湖州师范学院教师教育学院，湖州 313000) ([2]上海师范大学教育学院，上海 200030)

([3]浙江外国语学院教育学院，杭州 310023)

摘要 尽管已有研究发现数字以空间方式表征在人类记忆系统，但是人脑如何完成数字的空间表征尚存争议。本研究两个实验在不同比例的数字字母(实验 1)和不同比例的数字汉字(实验 2)混合情境中考察了数字空间表征特点及其机制，对上述争议进行了深入研究。结果发现：(1)当数字字母比例为“一比一”时，数字加工中不出现 SNARC 效应。当数字字母比例为“一比六”和“六比一”时，数字加工中均出现 SNARC 效应。即数字字母比例与数字 SNARC 效应之间呈倒“U”型关系。(2)数字汉字混合情境中数字汉字比例与数字 SNARC 效应之间同样呈倒“U”型关系。结果说明：(1)干扰刺激与数字混合呈现会影响数字 SNARC 效应。(2)干扰刺激加工对数字 SNARC 效应的影响受到数字与干扰刺激比例的调节，且具有跨干扰材料的稳定性。研究结果意味着数字的空间表征是人类通过统计学习在线建构的，支持了工作记忆理论。

关键词 SNARC 效应，数字，字母，空间表征，心理数字线，工作记忆

分类号：B842

1 问题提出

数字不仅是人类文明传承和信息传递的载体，也是人类完成特定任务的反应标识，并在人因工程领域得到了广泛的应用(如按压数字到达特定楼层)。研究数字的编码特点及其对人类行为反应的影响机制，在此基础上科学地利用数字设置特定任务能够有效地提高任务效率和任务进程中的用户体验。因此，数字认知成为了心理学研究的一个热点。Dehaene 等人要求被试对随机呈现在显示器中央的阿拉伯数字以左右手按键的方式进行分类反应时发现，小数字会诱发左手做出更快反应，大数字会诱发右手做出更快反应(Dehaene et al., 1990; Dehaene et al., 1993)。Dehaene 等人(1993)把阿拉伯数字加工中出现的这种现象命名为空间-数字反应编码联合效应(Spatial-Numerical Association of Response Codes effect)，即 SNARC

---

* 收稿日期: 2021-09-01
浙江省教育科学规划课题(GH2022058)和湖州师范学院人文社科预研究项目(2020SKYY02)资助。
通讯作者：石文典, E-mail: swd_nx@163.com

效应。而且 SNARC 效应同样可以出现在其他形式的符号数字(如中文、德文等)和非符号数字(如亮度、面积等)的加工之中(Fumarola et al., 2014; Fumarola et al., 2016; Kopiske et al., 2016; Nuerk et al., 2005; Prete, 2020; Wang et al., 2020)。甚至还可以延伸到顺序符号的加工之中，即序列前的顺序符号引发更快的左手反应，序列后的顺序符号引发更快的右手反应 (王强强, 2015; Gevers et al., 2003; Previtali et al., 2010; Zhang et al., 2016; Wang et al., 2019)。数字加工中 SNARC 效应的出现说明数字加工对人类行为反应会产生系统性影响。

数字加工为什么会对人类行为反应产生系统性影响呢？对于这一问题的解释，长期以来学术界存在心理数字线假说和工作记忆理论两种争议。心理数字线假说认为受人类阅读和写作习惯等文化经验的影响，人们在长时记忆中按照数字大小以空间的方式从左向右把数字表征在心理数字线上(从右向左阅读和写作群体正好相反)。数字在长时记忆中的空间表征诱发了数字加工中的 SNARC 效应(Dehaene et al., 1993; Gevers et al., 2003; Wang et al., 2019)。尽管心理数字线假说在解释 SNARC 效应时体现出了一定的优势，但是 van Dijck 和 Fias(2011)以连续呈现 5 个数字的方式启动数字的顺序信息，并要求被试以按键的方式对启动序列中出现过的数字进行奇偶分类时发现人们对启动序列中靠前的数字用左手反应更快，对启动序列中靠后的数字用右手反应更快，出现了序列位置效应，但未出现基于数字大小的 SNARC 效应。显然这一结果难以用心理数字线假说予以解释。基于此 van Dijck 和 Fias 摒弃了心理数字线假设，用工作记忆理论对 SNARC 效应进行了解释，认为 SNARC 效应直接源于数字在工作记忆中的空间表征。

数字在长时记忆中的空间表征主要受人类早期文化经验(如阅读和写作习惯)甚至遗传因素的影响(Bulf et al., 2016; Bulf et al., 2022; Dehaene et al., 1993; Shaki et al., 2009)，但数字在工作记忆中的空间表征易受情境因素(如启动顺序、干扰刺激、认知任务)的干扰，具有很大的情境依赖性，而且数字在工作记忆中的空间表征本质上是在线建构的(Abrahamse et al., 2014; Abrahamse et al., 2016; Guida & Campitelli, 2019; Guida & Lavielle-Guida, 2014; Guida & Maherault, 2021; Guida et al., 2018; van Dijck & Fias, 2011; Wang et al., 2021)。由此可以推测，在早期文化经验保持恒定的条件下，把数字和其他刺激符号混合后随机呈现给被试，不会影响数字在长时记忆中心理数字线上的空间表征，但是会干扰数字在工作记忆中的在线空间建构。而且不排除数字和其他刺激混合后随机呈现对数字在工作记忆中在线空间建构的干扰程度会受到数字与其它刺激比例调节的可能。因此，把数字和其他刺激混合呈现引发的干扰情境和数字与其他刺激符号的比例作为情境性因素进行操控，观察情境因素变化对 SNARC 效应的影响可以分离 SNARC 效应究竟直接源于符号在长时记忆中心理数字线上的空间表征

还是直接源于符号在工作记忆中的在线空间建构。

由于数字和其他刺激符号混合呈现不会影响数字在长时记忆中的空间表征，如果SNARC效应直接源于数字在长时记忆中心理数字线上的空间表征，那么不管数字与什么刺激混合，也不管数字与其他刺激混合比例如何，在与其他刺激混合呈现的数字加工中均应该出现SNARC效应；由于数字和其他刺激符号混合后随机呈现会干扰数字在工作记忆中的在线空间建构，如果SNARC效应直接源于数字在工作记忆中的在线空间建构，那么数字和其他刺激符号混合呈现可能通过人脑对其他刺激符号意义的认知或数字加工与其他刺激符号加工之间的任务转换两条途径影响SNARC效应，最终使得数字加工中的SNARC效应表现出情境依赖性。而且如果数字和其他刺激符号混合呈现通过人脑对其他刺激符号意义的认知影响数字加工中的SNARC效应的话，随着其他符号占比的增加，其他刺激符号加工对SNARC效应的干扰程度也会增加，数字加工中的SNARC效应就会相应地降低，数字和干扰刺激比例与SNARC效应的效应量之间就会呈线性关系；如果数字和其他刺激符号混合呈现通过数字加工与其他刺激符号加工之间的任务转换影响数字加工中SNARC效应的话，数字与其他刺激比例相等时转换频率更高，SNARC效应将会更小，甚至消失。两者占比差异越悬殊，任务转换频率会越低，SNARC效应将会越大，数字和干扰刺激比例与SNARC效应的效应量之间就会呈倒“U”型关系。

基于上述分析，本研究拟以具有空间属性的字母和不具空间属性的汉字为干扰刺激设计两项实验，要求被试执行数字大小分类任务和干扰刺激顺序或结构分类任务，在直接激活数字大小信息的实验条件下系统考察数字与其他干扰刺激混合呈现对SNARC效应的影响及其机制。同时本研究还操控数字与干扰刺激的比例，系统考察数字与其他干扰刺激混合呈现对SNARC效应的影响是否会受到数字与其他干扰刺激比例的调节。通过对上述问题的研究，推测数字加工对人类行为反应产生的系统性影响究竟直接源于数字在长时记忆中的空间表征还是直接源于数字在工作记忆中的在线空间建构。

2 实验1

实验1采用具有空间属性的字母为干扰刺激，分别在数字字母比例为“一比一”“六比一”和“一比六”的干扰情境中，要求被试执行数字大小和字母顺序分类任务，在直接激活数字大小和字母顺序的实验条件下考察字母加工对数字SNARC效应的干扰以及数字字母比例对字母干扰效应的调节情况。

2.1 实验1a

2.1.1 **被试** 采用 G*Power 3.1 对实验所需样本量进行估算。设置参数 effect size *f* 为 0.40，I 类错误的概率 α err prob 为 0.95 计算得知：达到上述要求，2×2 被试内设计最少需要 27 人(本研究后续所有实验均与此相同)。本实验招募 30(女 25，男 5)名在校大学生自愿参加，平均年龄为 19.43(*SD*=0.86)岁，年龄范围为 18~22 岁。所有被试视力或矫正视力均正常。

2.1.2 **材料和仪器** 采用 1、2、3、5、6、7、A、B、C、E、F、G 作为数字和字母材料。所有材料大小为 72 点，置于 70×70 像素的白底图片之上。实验刺激用 19 寸显示器呈现，实验程序在戴尔计算机上运行。显示器分辨率为 1024×768 像素，刷新频率 60HZ。

2.1.3 **实验设计** 采用 2(一致性：一致，不一致) ×2(刺激类型：数字，字母)被试内设计。其中 1、2、3 为小数字，5、6、7 为大数字。A、B、C 为靠前字母，E、F、G 为靠后字母。根据前人研究(Shi et al., 2020; Wang et al., 2021)，把小数字和靠前字母用左手反应，大数字和靠后字母用右手反应模式定义为一致。小数字和靠前字母用右手反应，大数字和靠后字母用左手反应模式定义为不一致。因变量为反应时。

2.1.4 **实验程序** 采用 E-prime1.1 软件编程。实验开始后首先在显示器中央呈现“+”注视点 500ms，注视点消失后在显示器中央随机呈现 1、2、3、5、6、7、A、B、C、E、F、G 中的一个数字或字母，要求被试以按键反应的方式判断呈现的数字大于 4 还是小于 4 或呈现的字母在字母表中位于 D 之前还是 D 之后。按键结束后呈现 1500ms 空屏后进入下一试次。整个实验分为两个 block，block1 要求被试用左手按 F 键对小数字或靠前字母反应，用右手按 J 键对大数字或靠后字母反应。Block2 要求被试右手按 J 键对小数字或靠前字母反应，左手按 F 键对大数字或靠后字母反应。两个 block 的先后顺序在被试间平衡。整个实验中呈现的数字字母比例为“一比一”，每个刺激重复呈现 16 次，共 192 个正式试次。每个 block 开始前有 12 次练习机会，且练习正确率高于 80%才能进入正式实验。整个实验约需 15 分钟。

2.1.5 **结果分析**

剔除错误反应和每个处理水平上 3 个标准差以外的反应时数据(占总数的 6.15%)。对剩余反应时进行重复测量方差分析。结果发现一致性主效应不显著，$F(1, 29)=1.46$，$p=0.24$，$\eta^2=0.05$，说明实验 1a 在数字和字母加工中可能未出现 SNARC 效应。刺激类型主效应显著，$F(1, 29)=77.87$，$p<0.001$，$\eta^2=0.73$，数字反应(487.06±10.24ms)快于字母反应(513.30±11.53ms)。一致性和刺激类型交互作用不显著，$F(1, 29)=2.56$，$p=0.12$，$\eta^2=0.08$。尽管刺激类型与一致性交互作用不显著，由于刺激类型主效应显著，为了防止数字和字母混合分析掩盖数字加工中的 SNARC 效应，我们进一步分析了数字和字母加工中的 SNARC 效应。结果发现数字分类任务中一致性简单主效应不显著，$F(1, 29)=0.43$，$p=0.52$，$\eta^2=0.02$。字母分类任务中一致

性简单主效应不显著，$F(1, 29)=2.22$，$p=0.15$，$\eta^2=0.07$，结果进一步确定实验 1a 在数字和字母加工中均未出现 SNARC 效应，见图 1。

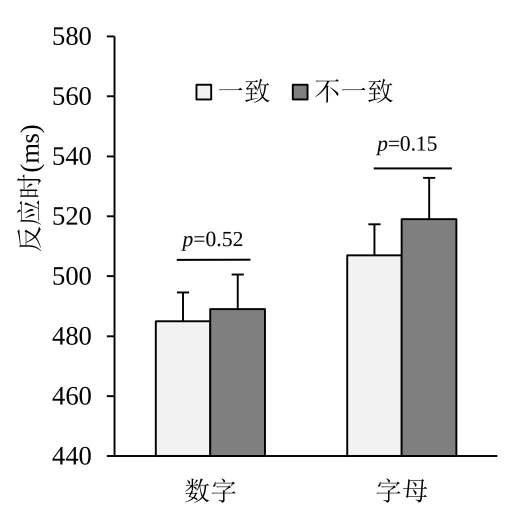


图 1. 数字字母比例为一比一时数字大小和字母顺序分类中一致与不一致的反应时及标准误

2.2 实验 1b

2.2.1 被试 本实验招募 32(女 25，男 7)名在校大学生自愿参加，平均年龄为 19.94(*SD*=2.06)岁，年龄范围为 18~27 岁。所有被试视力或矫正视力均正常。

2.2.2 材料和仪器 同实验 1a。

2.2.3 实验设计 采用 2(一致性：一致，不一致) ×2(刺激类型：数字，字母)被试内设计。因变量为反应时。

2.2.4 实验程序 与实验 1a 基本相同，不同之处在于实验 1b 中数字字母比例为“六比一”。正式实验中，每个数字重复呈现 36 次，每个字母重复呈现 6 次，共 252 试次。整个实验约需 20 分钟。

2.2.5 结果分析

剔除错误反应和每个处理水平上 3 个标准差以外的反应时数据(占总数的 5.17%)，对剩余反应时数据进行重复测量方差分析。结果发现一致性主效应显著，$F(1, 31)=15.04$，$p=0.001$，$\eta^2=0.33$，一致试次反应(535.75±12.44ms)快于不一致试次反应(573.87±16.48ms)，说明实验 1b 可能在数字或字母加工中出现了 SNARC 效应。刺激类型主效应显著，$F(1, 31)=176.70$，$p<0.001$，$\eta^2=0.85$，数字反应(496.17±10.43ms)快于字母反应(613.45±17.55ms)。一致性和刺激类型交互作用显著，$F(1, 31)=10.75$，$p=0.003$，$\eta^2=0.26$。进一步简单效应分析发现，数字分类中一致性简单主效应显著，$F(1, 31)=7.90$，$p=0.009$，$\eta^2=0.20$，一致试次反应(485.81±9.43ms)快于不一致试次反应(506.53±12.49ms)。字母分类中一致性简单主效应也显著，$F(1, 31)=15.79$，$p<0.001$，$\eta^2=0.34$，一致试次反应(585.69±16.06ms)快于不一致试次反应

(641.20±21.35ms)，结果说明实验 1b 在数字和字母加工中均出现了 SNARC 效应，见图 2。

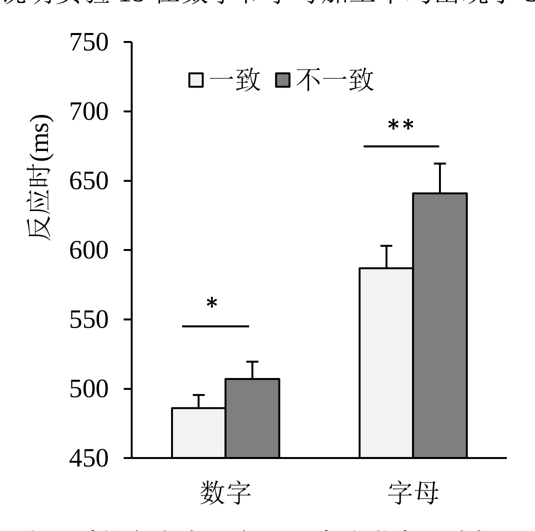


图 2. 数字字母比例为六比一时数字大小和字母顺序分类中一致与不一致的反应时及标准误

2.3 **实验 1c**

2.3.1 **被试** 本实验招募 32(女 26，男 6)名在校大学生自愿参加，平均年龄为 19.56(*SD*=1.56)岁，年龄范围为 18~24 岁。所有被试视力或矫正视力均正常。

2.3.2 **材料和仪器** 同实验 1a。

2.3.3 **实验设计** 采用 2(一致性：一致，不一致) ×2(刺激类型：数字，字母)被试内设计。因变量为反应时。

2.3.4 **实验程序** 与实验 1a 基本相同，不同之处在于实验 1c 中数字字母比例为“一比六”。正式实验中，每个数字重复呈现 6 次，每个字母重复呈现 36 次，共 252 试次。整个实验约需 20 分钟。

2.3.5 **结果分析**

剔除错误反应和每个处理水平上 3 个标准差以外的反应时数据(占总数的 6.05%)，对剩余反应时数据进行重复测量方差分析。结果发现一致性主效应显著，$F(1, 31)=18.67$，$p<0.001$，$\eta^2=0.38$，一致试次反应(550.80±11.11ms)快于不一致试次反应(598.20±13.12ms)，说明实验 1c 可能在数字和字母加工中出现 SNARC 效应。刺激类型主效应显著，$F(1, 31)=52.91$，$p<0.001$，$\eta^2=0.63$，字母反应(548.76±9.20ms)快于数字反应(600.24±13.25ms)。一致性和刺激类型交互作用不显著，$F(1, 31)=0.24$，$p=0.63$，$\eta^2=0.01$。考虑到被试对不同类型刺激反应差异显著，为了深入考察数字和字母加工中的 SNARC 效应，我们进一步分别分析了数字和字母加工中的 SNARC 效应。结果发现数字分类任务中一致性简单主效应显著，$F(1, 31)=10.26$，$p=0.003$，$\eta^2=0.25$，一致试次反应(577.52±13.47ms)快于不一致试次反应(622.72±16.39ms)。字母分类任务中一致性简单主效应也显著，$F(1, 31)=26.88$，$p<0.001$，$\eta^2=0.46$，一致试次反

应(523.85±9.50ms)快于不一致试次反应(573.68±11.19ms)，结果说明实验 1c 在数字和字母加工中均出现了 SNARC 效应，见图 3。

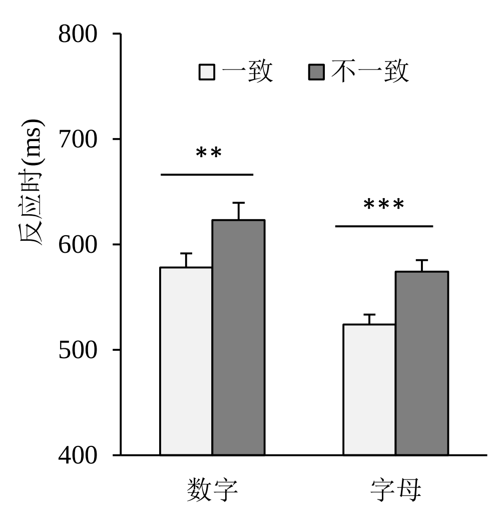


图 3. 数字字母比例为一比六时数字大小和字母顺序分类中一致与不一致的反应时及标准误

2.4 讨论

实验 1 采用具有空间属性的字母作为干扰刺激，三个子实验分别在数字字母比例为"一比一""六比一"和"一比六"的干扰情境中考察了字母加工对数字 SNARC 效应的干扰及其数字字母比例对字母干扰效应的调节情况。研究发现当数字字母比例为"一比一"时，即使强劲激活数字大小和字母顺序信息，在数字和字母加工中也不会出现 SNARC 效应。但是在数字字母比例为"一比六"和"六比一"的情境中，数字大小分类和字母顺序分类任务中均会出现 SNARC 效应。这一结果说明数字字母混合呈现对 SNARC 效应具有实质性影响，而且数字字母混合呈现对 SNARC 效应的影响受到数字字母比例的调节。

为了更加清晰地表示数字字母混合情境中数字字母比例对 SNARC 效应的干扰模式，我们参照前人的做法(Shi et al., 2020; Wang et al., 2021)，用不一致试次反应时减去一致试次反应时所得差值表示 SNARC 效应的效应量，然后以数字字母比例为横坐标，以 SNARC 效应的效应量为纵坐标绘制出了数字字母比例与 SNARC 效应的效应量之间的关系图，见下图 4。从图 4 中可以一目了然地看出数字字母混合情境中，字母加工对数字 SNARC 效应的干扰与数字字母比例呈倒"U"型关系。即当数字字母比例越接近"一比一"时，字母加工对数字 SNARC 效应的干扰越大，数字加工中的 SNARC 效应的效应量越小，甚至抑制了数字加工中的 SNARC 效应。当数字字母比例与"一比一"相差越大时，字母加工对数字 SNARC 效应的干扰越小，数字加工中的 SNARC 效应的效应量越大。此外，数字加工对字母加工中的类 SNARC 效应也有一定的干扰，而且数字加工对字母加工中类 SNARC 效应的干扰模式与数字字母比例也呈倒"U"型关系。

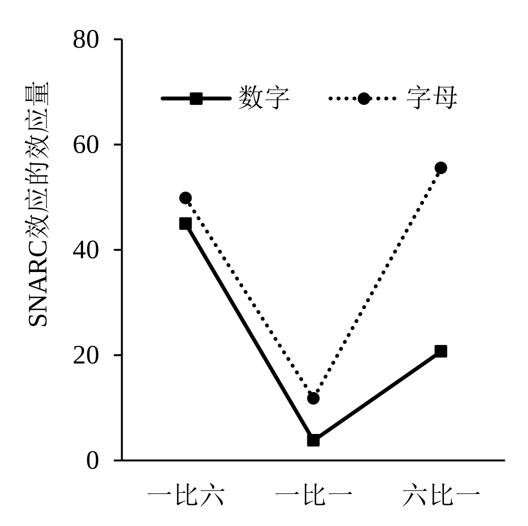


图 4. 不同数字字母比例中数字和字母加工中的 SNARC 效应的效应量

3 实验 2

实验 2 采用不具空间属性的汉字作为干扰刺激，分别在数字汉字比例为“一比一”“六比一”和“一比六”的干扰情境中考察具有空间属性的字母加工对数字 SNARC 效应的干扰模式会否延伸到不具空间属性的干扰刺激加工之中，进一步探讨数字的空间编码机制。

3.1 实验 2a

3.1.1 **被试** 本实验招募 30(女 24，男 6)名在校大学生、研究生自愿参加，平均年龄为 20.67(*SD*=3.63)岁，年龄范围为 17~34 岁。所有被试视力或矫正视力均正常。

3.1.2 **材料和仪器** 仪器同实验 1a，实验 2a 选取 1、2、3、5、6、7 为数字材料，校、困、床、较、应、园为汉字材料。字体及大小同实验 1a。

3.1.3 **实验设计** 采用 2(一致性：一致，不一致) ×2(刺激类型：数字，汉字)被试内设计。因变量为反应时。数字-反应一致性定义同实验 1a。由于汉字-反应之间不具一致性，为了精简实验设计和结果分析，我们参考 SNARC 效应匹配方式，暂把含“木”字的汉字用左手反应，不含“木”字的汉字用右手反应定义为一致，把含“木”字的汉字用右手反应，不含“木”字的汉字用左手反应定义为不一致。实验 2b 与实验 2c 与此相同。

3.1.4 **实验程序** 与实验 1a 基本相同，不同之处在于实验 2a 随机呈现一个数字或汉字(数字汉字比例为“一比一”)，要求被试判断呈现数字大于还是小于 4 或呈现汉字中是否含有“木”字。正式实验中，每个数字和汉字均重复呈现 16 次，共 192 试次。整个实验约需 15 分钟。

3.1.5 **结果分析**

剔除错误反应和每个处理水平上 3 个标准差以外的反应时数据(占总数的 7.97%)，对剩余反应时数据进行重复测量方差分析。结果发现一致性主效应不显著，$F(1, 29)=1.43$，$p=0.24$，$\eta^2=0.05$，说明实验 2a 在数字和汉字加工中可能未出现 SNARC 效应。刺激类型主效应显著，

$F(1, 29)=100.38$, $p<0.001$, $\eta^2=0.78$, 数字反应(625.53±16.55ms)远快于汉字反应(698.63±16.72ms)。一致性和刺激类型交互作用不显著，$F(1, 29)=1.03$，$p=0.32$，$\eta^2=0.03$。尽管刺激类型与一致性交互作用不显著，为了深入考察汉字加工对数字 SNARC 效应的干扰，我们依然分别分析了数字和汉字加工中的 SNARC 效应。结果发现数字分类任务中一致性简单主效应不显著，$F(1, 29)=2.18$，$p=0.15$，$\eta^2=0.07$。汉字分类任务中一致性简单主效应也不显著，$F(1, 29)=0.35$，$p=0.56$，$\eta^2=0.01$，说明实验 2a 确实在数字和汉字加工中均未出现 SNARC 效应，见图 5。

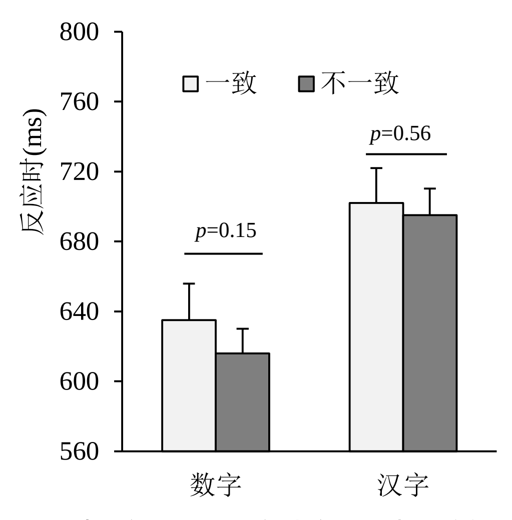


图 5. 数字汉字比例为一比一时数字大小和汉字结构分类中一致与不一致的反应时及标准误

3.2 实验 2b

3.2.1 **被试** 本实验招募 30(女 27，男 3)名在校大学生、研究生自愿参加，平均年龄为 20.30(*SD*=2.49)岁，年龄范围为 18~27 岁。所有被试视力或矫正视力均正常。

3.2.2 **材料和仪器** 同实验 2a。

3.2.3 **实验设计** 采用 2(一致性：一致，不一致) ×2(刺激类型：数字，汉字)被试内实验设计。因变量为反应时。

3.2.4 **实验程序** 与实验 2a 基本相同，不同之处在于实验 2b 中数字汉字比例为“六比一”。正式实验中，每个数字重复呈现 36 次，每个汉字重复呈现 6 次，共 252 试次。整个实验约需 20 分钟。

3.2.5 **结果分析**

剔除错误反应和每个处理水平上 3 个标准差以外的反应时数据(占总数的 6.35%)，对剩余反应时数据进行重复测量方差分析。结果发现一致性主效应显著，$F(1, 29)=5.83$，$p=0.02$，$\eta^2=0.17$，一致试次反应(670.59±18.13ms)快于不一致试次反应(699.87±22.73ms)，说明实验 2b 在数字或汉字加工中可能出现了 SNARC 效应。刺激类型主效应显著，$F(1, 29)=155.69$，

p<0.001，η^2=0.84，数字反应(543.98±12.69ms)快于汉字反应(826.48±29.45ms)。一致性和刺激类型交互作用不显著，$F(1, 29)$=0.60，p=0.45，η^2=0.02。尽管刺激类型与一致性交互作用不显著，为了深入考察汉字加工对数字 SNARC 效应的干扰，我们依然分别分析了数字和汉字加工中的 SNARC 效应。结果发现数字分类任务中一致性简单主效应显著，$F(1, 29)$=6.86，p=0.014，η^2=0.19，一致试次反应(533.57±12.38ms)快于不一致试次反应(554.38±14.17ms)，说明实验 2b 在数字分类中出现了 SNARC 效应。汉字分类任务中一致性简单主效应不显著，$F(1, 29)$=3.03，p=0.09，η^2=0.09，说明实验 2b 在汉字加工中未出现类 SNARC 效应，见图 6。

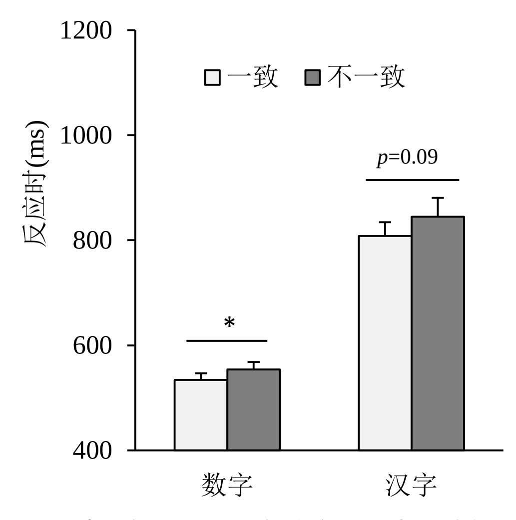


图 6. 数字汉字比例为六比一时数字大小和汉字结构分类中一致与不一致的反应时及标准误

3.3 实验 2c

3.3.1 被试 本实验招募 32(女 26，男 6)名在校大学生自愿参加，平均年龄为 20.21(*SD*=2.24)岁，年龄范围为 18~25 岁。所有被试视力或矫正视力均正常。

3.3.2 材料和仪器 同实验 2a。

3.3.3 实验设计 采用 2(一致性：一致，不一致) ×2(刺激类型：数字，汉字)被试内设计。因变量为反应时。

3.3.4 实验程序 与实验 2a 基本相同，不同之处在于实验 2c 中数字汉字比例为“一比六”。正式实验中，每个数字重复呈现 6 次，每个汉字重复呈现 36 次，共 252 试次。整个实验约需 20 分钟。

3.3.5 结果分析

剔除错误反应和每个处理水平上 3 个标准差以外的反应时数据(占总数的 6.56%)，对剩余反应时数据进行重复测量方差分析。结果发现一致性主效应不显著，$F(1, 31)$=1.67，p=0.21，η^2=0.05，说明实验 2c 在数字和汉字加工中可能未出现 SNARC 效应。刺激类型主效应显著，$F(1, 31)$=79.51，p<0.001，η^2=0.72，汉字反应(615.66±12.59ms)远快于数字反应

(704.19±16.62ms)。一致性和刺激类型交互作用显著，$F(1, 31)=16.13$，$p<0.001$，$\eta^2=0.34$。简单效应分析发现数字分类任务中一致性简单主效应显著，$F(1, 31)=5.95$，$p=0.02$，$\eta^2=0.16$，一致试次反应(681.82±18.80ms)快于不一致试次反应(726.56±19.16ms)，说明实验 2c 数字分类中出现了 SNARC 效应。汉字分类任务中一致性简单主效应不显著，$F(1, 31)=0.40$，$p=0.53$，$\eta^2=0.01$，说明实验 2c 在汉字加工中未出现类 SNARC 效应，见图 7。

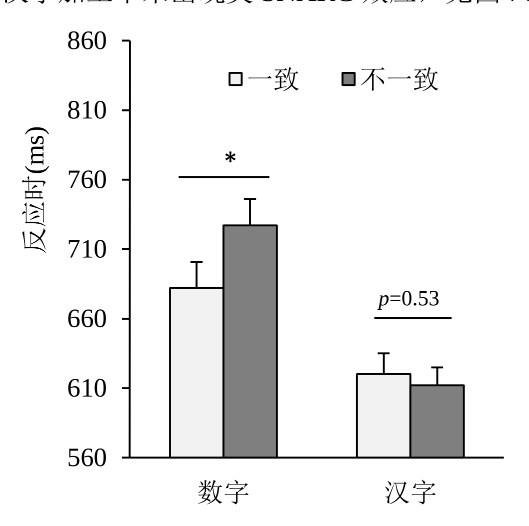


图 7. 数字汉字比例为一比六时数字大小和汉字结构分类中一致与不一致的反应时及标准误

3.4 讨论

实验 2 采用不具有空间属性的汉字作为干扰刺激，三个子实验分别在数字汉字比例为“一比一”“六比一”和“一比六”的干扰情境中深入考察字母加工对数字 SNARC 效应的干扰模式是否可以延伸到不具空间属性的汉字加工之中。研究发现当数字汉字比例为“一比一”时，在数字和汉字加工中未出现 SNARC 效应，但是在数字汉字比例为“一比六”和“六比一”的干扰情境中，数字加工中均出现了 SNARC 效应。这一结果说明数字汉字混合呈现对数字 SNARC 效应也具有实质性影响，而且数字汉字混合呈现对数字 SNARC 效应的影响同样也会受到数字汉字比例的调节。

为了更加清晰地表达数字汉字混合情境中数字汉字比例对 SNARC 效应的干扰模式，我们同样参照实验 1 的做法，用不一致试次反应时减去一致试次反应时所得差值表示 SNARC 效应的效应量，然后以数字汉字比例为横坐标，以 SNARC 效应的效应量为纵坐标绘制出了数字汉字比例与 SNARC 效应的效应量之间的关系图，见下图 8。从图 8 中可以一目了然地看出数字汉字混合情境中，汉字加工对数字 SNARC 效应的干扰与数字汉字比例呈倒“U”型关系。即当数字汉字比例为“一比一”时，汉字加工对数字 SNARC 效应的干扰最大，数字加工中的 SNARC 效应的效应量最小，甚至抑制了数字加工中的 SNARC 效应。当数字汉字比例与“一比一”相差越大时，汉字加工对数字 SNARC 效应的干扰越小，数字加工中的 SNARC

效应的效应量也越大。实验 2 研究结果说明字母加工对数字 SNARC 效应的干扰模式可以延伸到不具空间属性的汉字加工之中。

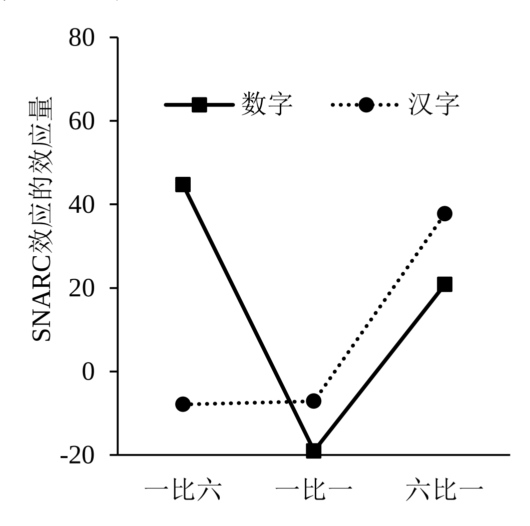


图 8. 不同数字汉字比例中数字和汉字加工中的 SNARC 效应的效应量

4 总讨论

尽管研究已经发现数字加工对人类行为反应会产生系统性影响，而且科学家们已经意识到这一影响与数字在人脑的空间表征相关，但是数字加工对人类行为反应的影响究竟直接源于数字在长时记忆中的空间表征还是直接源于数字在工作记忆中的在线空间建构依然存在争议。本研究在不同比例的数字字母和不同比例的数字汉字混合呈现的干扰情境中考察了数字编码特点及其机制，对上述争议进行了研究。

实验 1 以具有空间属性的字母作为干扰刺激，三个子实验在数字字母比例分别为"一比一""六比一"和"一比六"的数字字母混合呈现情境中，通过要求被试判断呈现数字的大小或呈现字母的顺序的方式直接激活数字大小和字母顺序信息，考察了字母加工对数字 SNARC 效应的干扰以及数字字母比例对字母干扰效应的调节情况。结果发现即使数字大小和字母顺序被直接激活，当数字字母比例为"一比一"时，数字和字母混合呈现情境中数字和字母加工中也均未出现 SNARC 效应。自从 Dehaene 等人(1993)在数字加工中捕获到 SNARC 效应之后，后续研究在不同形式的数字和顺序符号(如字母，月份，天数等)加工中均发现了 SNARC 效应，确信 SNARC 效应广泛地存在于各种数字和顺序符号的加工之中(Gevers et al., 2003; Prete, 2020; Wang et al., 2019; Wang et al., 2020)。然而实验 1a 在数字字母比例为"一比一"的干扰情境中强劲激活数字大小和字母顺序后未捕获到 SNARC 效应。与前人研究范式唯一的不同之处是实验 1a 把数字和字母以"一比一"的比例混合后随机呈现给被试。实验 1a 在数字和字母加工中未捕获到 SNARC 效应，唯一解释就是数字和字母"一比一"的混合呈现情境干扰了数字和字母加工中的 SNARC 效应。

数字和字母混合呈现如何干扰数字加工中的 SNARC 效应呢？对数字字母混合情境分析可以推断数字和字母混合情境对 SNARC 效应的干扰可能有两条路径：一是字母意义的认知干扰了 SNARC 效应；二是数字加工和字母加工之间的任务转换干扰了 SNARC 效应。一般来说，在数字字母混合随机呈现情境中，数字字母比例越接近"一比一"，数字加工和字母加工之间的任务转换越频繁。相反，数字字母比例越远离"一比一"，数字加工和字母加工之间的任务转换越不频繁。比如随机呈现一个数字九个字母(一比九)时，数字加工和字母加工之间只需转换一次。随机呈现五个数字五个字母(一比一)时，数字加工和字母加工之间往往需转换多次。因此，如果数字和字母混合随机呈现情境对 SNARC 效应的干扰通过任务转换这一路径实现，那么数字字母比例越接近"一比一"，数字字母混合情境中字母加工对数字 SNARC 效应的干扰越大，数字 SNARC 效应的效应量也会越小。当数字字母比例越远离"一比一"，数字字母混合情境中字母加工对数字 SNARC 效应的干扰越小，数字 SNARC 效应的效应量也会越大。即数字字母比例与 SNARC 效应的效应量之间将呈倒"U"型关系。如果字母对数字的干扰是通过字母意义的认知这一路径实现，那么字母占比越大，字母意义认知对数字 SNARC 效应的干扰也会越大，数字 SNARC 效应随着数字字母比例变化的模式更可能是线性关系。实验 1b 和实验 1c 把数字字母比例增加到"六比一"或降低到"一比六"时在数字和字母混合呈现情境中均捕获到了 SNARC 效应。通过实验 1 中三个子实验结果可以清晰看出数字字母比例与数字 SNARC 效应的效应量之间呈倒"U"型关系。很显然，这一结果与任务转换的干扰路径的预测拟合。由此可以断定数字字母混合呈现情境中字母加工对数字 SNARC 的影响主要通过任务转换实现。已有研究发现任务转换可以影响 SNARC 效应(王强强 等, 2018)，我们推测数字字母混合呈现对数字字母加工中 SNARC 的影响主要通过任务转换实现的论断一定程度上也能得到王强强等人研究的支持。

实验 1 采用字母为干扰刺激研究发现数字字母混合呈现通过任务转换对 SNARC 效应产生了实质性的影响。由于字母本身具有空间属性(Gevers et al., 2003; Wang et al., 2021)，以具有空间属性的字母为干扰刺激得到的结论能否延伸到不具空间属性的其他刺激干扰情境中呢？实验 2 进一步采用不具空间属性的汉字作为干扰刺激，设计了 3 个子实验对这一问题进行了研究。在数字汉字混合呈现情境中，当数字汉字比例为"一比一"时，实验 2a 在强劲激活数字大小信息的条件下也没有捕获到 SNARC 效应。相反，当把数字汉字比例增加到"六比一"或减小到"一比六"时，实验 2b 和实验 2c 在数字加工中捕获到了 SNARC 效应。显然，数字汉字比例与数字 SNARC 效应的效应量之间也呈倒"U"型关系，结果再次复制了实验 1 数字字母混合呈现情境中的干扰模式，再次说明数字和干扰刺激混合呈现对数字 SNARC 效

应的干扰主要来自任务转换。同时也意味着，具有空间属性的字母加工对数字空间编码的干扰模式可以延伸到不具空间属性的其他刺激加工之中。此外，实验 1 和实验 2 干扰刺激有着本质的区别，前者具有空间属性，后者不具有空间属性，但两种本质不同的刺激对数字 SNARC 效应的干扰模式相同，这点一定程度上也能排除干扰刺激对数字 SNARC 效应的影响来自刺激本身信息加工的可能。

尽管学术界普遍认为数字加工中的 SNARC 效应源于数字在人脑的空间表征(Guida & Campitelli, 2019; Guida & Lavielle-Guida, 2014; Guida et al., 2018; Wang et al., 2021)，但是 SNARC 效应直接源于数字在长时记忆还是直接源于数字在工作记忆中的空间表征学术界依然存在激烈争论(Abrahamse et al., 2014; Abrahamse et al., 2016; Dehaene et al., 1993; Gevers et al., 2003; Previtali et al., 2010; van Dijck & Fias, 2011; Wang et al., 2021)。数字在长时记忆中的空间表征受到阅读和写作习惯等文化经验甚至遗传因素的影响(Bulf et al., 2016; Bulf et al., 2022; Dehaene et al., 1993; Shaki et al., 2009)，但数字在工作记忆的空间表征易受情境因素的干扰，具有很大的情境依赖性(Abrahamse et al., 2014; Abrahamse et al., 2016; Guida & Campitelli, 2019; Guida & Lavielle-Guida, 2014; Guida & Maherault, 2021; Guida et al., 2018; Wang et al., 2021)。实验 1 和实验 2 把数字和具有空间属性或不具有空间属性的刺激混合呈现，并控制了数字和干扰刺激比例，在数字与其他刺激混合呈现的干扰情境中考察了干扰刺激对数字 SNARC 效应的影响及其数字与干扰刺激比例对干扰刺激干扰效应的调节情况。结果发现数字 SNARC 效应与数字和干扰刺激的比例呈倒“U”型关系，表现出了很大的情境依赖性。如果数字 SNARC 效应直接源于数字在长时记忆中的空间表征，数字 SNARC 效应不会与干扰刺激的干扰程度呈倒“U”型关系，显然这与本研究的结果不符。由于数字在工作记忆的空间表征是在线建构的，而且数字在工作记忆中的在线空间建构过程中编码线索的选取很容易受到情境因素的制约，具有很大的情境依赖性(Abrahamse et al., 2014; Abrahamse et al., 2016; Guida & Campitelli, 2019; Guida & Lavielle-Guida, 2014; Guida & Maherault, 2021; Guida et al., 2018; Wang et al., 2021)，如果数字 SNARC 效应源于数字在工作记忆中的空间表征，那么在数字与干扰刺激混合呈现情境中，数字 SNARC 效应可能随着干扰情境的变化而变化。本研究两个实验通过系列子实验研究发现，数字 SNARC 效应随着数字和干扰刺激比例变化表现出很大的情境依赖性，结果与工作记忆的预期完全符合，支持了工作记忆理论。因此，基于本研究两项实验我们认为，数字的空间表征是个体通过统计学习在工作记忆中在线建构的。

颜丽珠等人(2022)提出双阶段加工模型解释了数字加工中的 SNARC 效应的灵活性，认

为 SNARC 效应既可以发生在数量信息的空间表征阶段，也可以发生在数量的空间表征到反应选择阶段。但是无论 SNARC 效应发生在哪个阶段，一旦该加工阶段受到某些因素干扰就会影响到数字加工中的 SNARC 效应，从而使数字加工中出现不同形式的 SNARC 效应。本研究在操控数字和其他刺激的干扰情境中，在控制数字与其他干扰刺激比例的实验条件下系统研究了其他刺激加工对数字空间表征在线建构的影响及其机制。研究发现其他刺激干扰对数字 SNARC 效应会带来实质性的影响，而且其他刺激加工对 SNARC 效应的影响受到数字与其他干扰刺激比例的调节。从研究结果可以清晰看出，干扰情境和数字占比的设置对数字空间表征的在线建构有重要影响。颜丽珠等人认为数字空间表征阶段若受到任何因素的干扰都会影响到数字加工中的 SNARC 效应。本研究的系列实验操作诱导的干扰情境虽然不会影响数字在长时记忆中心理数字线上的空间表征，但是会干扰数量信息在工作记忆中的在线空间建构。从双阶段加工模型视角来说，本研究的实验操作干扰了数量信息的空间表征阶段。结果发现数字加工中 SNARC 效应随着干扰情境的变化而变化，进一步说明数量信息的空间表征阶段受到干扰会对数字 SNARC 效应产生实质性影响，这与颜丽珠等人提出的双阶段加工模型的预期完全符合。结果进一步支持了双阶段加工模型，同时也有助于加深人们对数量信息的空间表征阶段的数字空间表征形成过程的认识。

5 结论

(1)数字和其他刺激混合呈现会干扰数字加工中的 SNARC 效应。(2)数字和其他刺激混合呈现对数字 SNARC 效应的干扰作用受到数字和其他刺激比例的调节，且具有跨干扰材料的稳定性。

参考文献：

Abrahamse, E., van Dijck, J. P., Majerus, S., & Fias, W. (2014). Finding the answer in space: the mental whiteboard hypothesis on serial order in working memory. *Frontiers in Human Neuroscience, 8,* 1–12.

Abrahamse, E., van Dijck, J. P., & Fias, W. (2016). How does working memory enable number-induced spatial biases?. *Frontiers in Psychology, 7,* 1–11.

Bulf, H., Capparini, C., Nava, E., de Hevia, M. D., & Cassia, V. M. (2022). Space modulates cross-domain transfer of abstract rules in infants. *Journal of Experimental Child Psychology, 213,* 1–11.

Bulf, H., de Hevia, M. D., & Cassia, M. V. (2016). Small on the left, large on the right: numbers orient visual attention onto space in preverbal infants. *Developmental Science, 19*(3), 394–401.

Dehaene, S., Dupoux, E., & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? analogical and symbolic effects in

two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 16*(3), 626–641.

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General, 122*(3), 371–396.

Fumarola, A., Prpic, V., Pos, O. D., Murgia, M., Umiltà, C., & Agostini, T. (2014). Automatic spatial association for luminance. *Attention Perception & Psychophysics, 76*(3), 759–765.

Fumarola, A., Prpic, V., Fornasier, D., Sartoretto, F., Agostini, T., & Umilta, C. (2016). The spatial representation of angles. *Perception, 45*(11), 1320–1330.

Gevers, W., Reynvoet, B., & Fias, W. (2003). The mental representation of ordinal sequences is spatially organized. *Cognition, 87*(3), B87–B95.

Guida, A., & Campitelli, G. (2019). Explaining the SPoARC and SNARC effects with knowledge structures: an expertise account. *Psychonomic Bulletin & Review, 26,* 434-451.

Guida, A., & Lavielle-Guida, M. (2014). 2011 space odyssey: spatialization as a mechanism to code order allows a close encounter between memory expertise and classic immediate memory studies. *Frontiers in Psychology, 5,* 1–5.

Guida, A., & Maherault, M. (2021). Bootstrapping the visuospatial bootstrapping effect and testing its spatialisation. *Memory, 29*(4), 456–470.

Guida, A., Megreya, A. M., Magali, L. G., Yvonnick, N., Fabien, M., van Dijck, J. P., & Abrahamse, E. (2018). Spatialization in working memory is related to literacy and reading direction: culture “literarily” directs our thoughts. *Cognition, 175,* 96–100.

Kopiske, K. K., Löwenkamp, C., Eloka, O., Schiller, F., Kao, C. S., Wu, C., Gao, X. & Franz, V. H. (2016). The SNARC effect in chinese numerals: do visual properties of characters and hand signs influence number processing? *Plos One, 11*(9), 1–19.

Nuerk, H. C., Wood, G., & Willmes, K. (2005). The universal SNARC effect: The association between number magnitude and space is amodal. *Experimental Psychology, 52*(3), 187–194.

Prete, G. (2020). Spatializing emotions besides magnitudes: is there a left-to-right valence or intensity mapping?. *Symmetry, 12*(5), 1–13.

Previtali, P., de Hevia, M. D., & Girelli, L. (2010). Placing order in space: the SNARC effect in serial learning. *Experimental Brain Research, 201*(3), 599–605.

Shaki, S., Fischer, M. H., & Petrusic, W. M. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the

SNARC effect. *Psychonomic Bulletin & Review, 16*(2), 328–331.

Shi, W., Wang, Q., Deng, M., & Xu, D. (2020). The influence of the location of ordered symbols on the ordinal position effect: the involvement of the task performed. *Acta Psychologica, 202,* 1–8.

van Dijck, J. P., & Fias, W. (2011). A working memory account for spatial–numerical associations. *Cognition, 119*(1), 114–119.

Wang, Q. Q. (2015). *The research on the cause of SNARC effect---induced by size or order information？* (Unpublished master’s thesis). Northeast Normal University, Changchun.

[王强强. (2015). *SNARC 效应的起因探究——大小还是顺序信息引起？* (硕士学位论文). 东北师范大学, 长春.]

Wang, Q., An, B., Yue, H., Tao, W., & Shi, W. (2021). Interaction mechanism between location and sequence in letter cognition. *Acta Psychologica, 217,* 1–8.

Wang, Q., Nie, T., Zhang, W., & Shi, W. (2019). The mechanism of the ordinal position effect: stability across sense modalities and the hands crossed context. *I-perception, 10*(2), 1–16.

Wang, Q. Q., Shi, W. D., & Ye, J. (2018). The impact effect of the task switch on the SNARC effect. *Chinese Journal of Applied Psychology, 24*(3), 271–279.

[王强强, 石文典, 叶晶. (2018). 任务转换对 SNARC 效应的抑制. *应用心理学, 24*(3), 271–279.]

Wang, Z., Zhu, X., & Jiang, Y. (2020). Influence of number location on the SNARC effect: evidence from the processing of rotated traditional chinese numerical words. *I-perception, 11*(2), 1–18.

Yan, L. Z., Chen, Y. X., Liu, X., Fu, S. M., & Nan, W. Z. (2022). The flexibility of spatial-numerical associations and its internal mechanism. *Advances in Psychological Science, 30*(1), 1–14.

[颜丽珠, 陈妍秀, 刘勋, 傅世敏, 南威治. (2022). 数字空间联结的灵活性及其内在机制. *心理科学进展, 30*(1), 1–14.]

Zhang, M., Gao, X., Li, B., Yu, S., Gong, T., Jiang, T., Hu, Q., & Chen, Y. (2016). Spatial representation of ordinal information. *Frontiers in Psychology, 7,* 1–6.

Online Construction of Spatial Representation of Numbers: Evidence from the SNARC Effect in Number Processing in Interferential Situations

WANG Qiangqiang[1], ZHANG Qi[1], SHI Wendian[2], WANG Zhiwei[1], ZHANG Pengcheng[3]

([1] School of Teacher Education, Huzhou University, Huzhou 313000) ([2] School of Education, Shanghai Normal University, Shanghai, 200030) ([3] School of Education, Zhejiang International Studies University, Hangzhou, 310023)

Abstract When randomly and centrally presenting different numbers on the display and asking participants to classify the probe numbers by pressing specified key of keyboard according to numerical magnitude or parity or numerical other natures, participants invariably respond faster to small numbers with the left key pressing than the right key pressing. However, participants respond faster to large numbers with the right key pressing than the left key pressing. This phenomenon was the spatial-numerical association of the response code (SNARC) effect. Although previous studies believed that the SNARC effect was the product of the spatial representation of numbers in individuals' brains, it is unclear whether the spatial representation of numbers takes place in individuals' long-term memory or their working memory. The spatial representation of numbers in long-term memory was caused by individuals' early cultural experience, especially their reading and writing direction, and even influenced by genetic factors; however, the spatial representation of numbers in working memory was influenced by situational factors such as the provisional order of numbers, cognition tasks, interferential stimuli and was constructed online. When randomly presenting the numbers and other symbols in one experiment and asking participants to classify the numbers and other symbols depending on specific natures, the spatial representation of numbers in long-term memory was not influenced by the randomly presented context. However, the spatial representation of numbers in working memory was influenced by it. Therefore, it can be inferred that the SNARC effect was induced by other spatial representations of numbers in long-term memory or the spatial representation of numbers in working memory in the numbers and symbols randomly presented context.

Therefore, this study randomly presented numbers and letters or Chinese characters and explored the rapid presentation stimulus classification paradigm, in which participants were asked to classify numbers depending on the numerical magnitude and classify letters depending on the letters' sequence in the alphabet or classify Chinese characters depending on the Chinese characters' composition among the two experiments to investigate the encoding mechanism of the SNARC effect in processing numbers in the numbers and letters or Chinese characters randomly presented context to reveal whether the SNARC effect was caused by either the spatial representation of numbers in the mental number line of long-term memory, or the spatial

representation of numbers in working memory. In addition, both the ratio of numbers to letters and to Chinese characters were manipulated in this study to investigate whether the SNARC effect on processing numbers in interferential situations was moderated by either the ratio of numbers to letters or to Chinese characters. The results show that (1) when both the ratio of numbers to letters were equal, no SNARC effect was captured in the processing of numbers in interferential situations; however, when both the ratio of numbers to letters were "6 to 1" and "1 to 6," the SNARC effect appeared in the processing of numbers in interferential situations. That is, an inverted U-shaped relationship existed between the alphanumeric ratio and SNARC effect. (2) The inverted U-shaped relationship between the alphanumeric ratio and SNARC effect can also extend to the processing of numbers in mixed number and Chinese character situations.

In conclusion, these results show that (1) randomly presenting the interference stimulus and numbers in one experiment can influence the SNARC effect in processing numbers by task switching. (2) The SNARC effect in processing numbers was moderated by the ratio of numbers to interference stimuli in interferential situations, regardless of the interference stimulus used. These results imply that spatial representations of numbers are constructed online by humans through statistical learning, and the results support the working memory account for the SNARC effect.

Keywords SNARC effect, numbers, letters, spatial representation, mental number line, working memory